4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Μορφές Θορύβου (Liao σελ. 115, Vendelin σελ. 71-72, Pozar σελ. 584)

1. Θερμικός Θόρυβος: ή θόρυβος Johnson, ή Nyquist

   Τυχαίες διακυμάνσεις της ροής ηλεκτρονίων σε ένα αγωγό λόγω θερμικών ταλαντώσεων των δεσμευμένων φορέων

2. Κρουστικός Θόρυβος ή Θόρυβος Schottky (Shot Noise)

   - Διακυμάνσεις στο πλήθος των φορέων σε ένα ρεύμα.
   - Εμφανίζεται σε όλα τα ενεργά στοιχεία λόγω της διακριτής φύσης της ροής των ηλεκτρονίων.

3. Θόρυβος Αναλαμπών (Flicker Noise)

   - Εμφανίζεται στα στοιχεία στερεάς κατάστασης και στις
   - λυχνίες και η ισχύς του είναι αντιστρόφως ανάλογη
   - της συχνότητας $N \propto 1/f$ → ονομάζεται θόρυβος $1/f$.

4. Θόρυβος Πλάσματος
5. Κβαντικός Θόρυβος

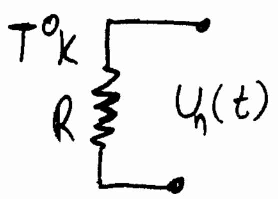
Πηγές Θορύβου: χρειάζονται συνήθως στις μετρήσεις θορύβου.

α. Παθητικές: αποτελούνται από μια ωμική αντίσταση τοποθετημένη σε θάλαμο σταθερής - ελεγχόμενης θερμοκρασίας.

β. Ενεργές: υλοποιούνται σε μορφή λυχνιών εκφόρτισης αερίου ή δίοδοι - χιονοστιβάδας (avalanche diodes)

Ισχύς - Τάση - Αντίσταση Θορύβου:

- Αντίσταση σε θερμοκρασία $T\,^{o}K$

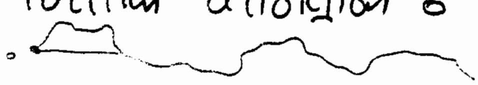


Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων είναι $\propto T\,^{o}K$ ⟹ τυχαίες διακυμάνσεις τάσης στα άκρα της αντίστασης $u_n(t)$

Κβαντομηχανική → Ακτινοβολία μέλανος σώματος (Νόμος Planck):

→ Μέση τιμή της $u(t)$: $V_{av} = \langle U \rangle = 0$ = μηδενική d.c. συνιστώσα.

→ Τυπική απόκλιση σ = rms τάση



$$U_{n,rms} = \sqrt{\frac{4hfBR}{e^{hf/kT} - 1}}$$

Τάση Θορύβου; αντίσταση R σε θερμοκρασία $T^\circ K$

$$U_n = U_{n,rms} = \sqrt{\frac{4hfBR}{e^{hf/KT}-1}}$$ Νόμος Planck, ακτινοβολία μέλανος σώματος

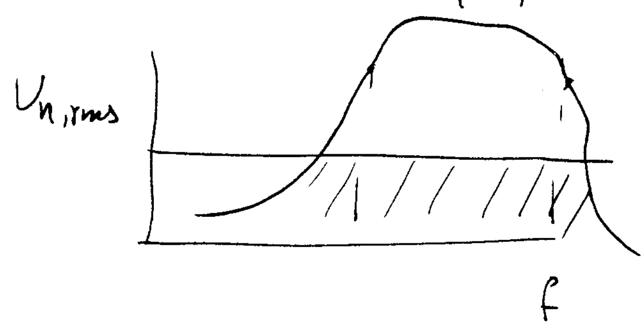
$h = 6.546 \times 10^{-34}$ Joule.Sec σταθερά του Planck
$K = 1.38 \times 10^{-23}$ $J/^\circ K$ σταθερά του Boltzmann
B = Εύρος ζώνης f = Κεντρική συχνότητα
$KT_0 \big|_{T_0 = 300^\circ K\ (17^\circ C)} = 4 \times 10^{-21}$ W/Hz 1 Joule = 1W.1Sec

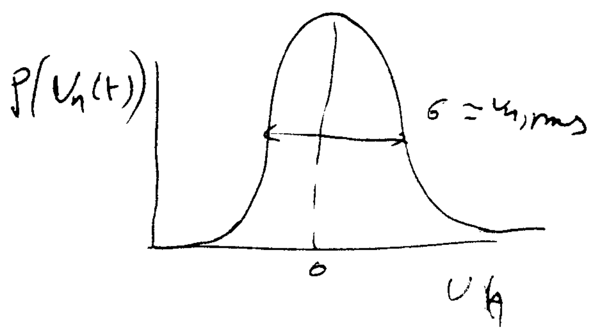
Μικροκυματικές Συχνότητες: $hf << KT$
Χειρότερη περίπτωση: $f = f_{max} = 100GHz$, $T_{min} \approx 100^\circ K$ $\Big\}$ $hf = 6.5\times10^{-23} << KT = 1.4\times10^{-21}$

Αλλά:
$$e^x\big|_{x<<1} \approx 1 + x \Rightarrow e^{hf/KT} - 1 \approx 1 + \frac{hf}{KT} - 1 = \frac{hf}{KT}$$

Άρα:
$$U_n \approx \sqrt{\frac{4\cancel{hf}BR}{\cancel{hf}/KT}} = \boxed{\sqrt{4KTBR} \approx U_n}$$
Προσέγγιση Rayleigh - Jeans

Προσοχή:
→ Η τάση U_n είναι: ανεξάρτητη της συχνότητας f και ανάλογη του Εύρους ζώνης B
→ Μια τέτοια Πηγή θορύβου παρουσιάζει φασματική πυκνότητα ισχύος σταθερή ως προς τη συχνότητα → Λευκός Θόρυβος
→ Πηγές λευκού θορύβου → Gaussian τυχαίες μεταβλητές και η ισχύς θορύβου είναι προσθετική.

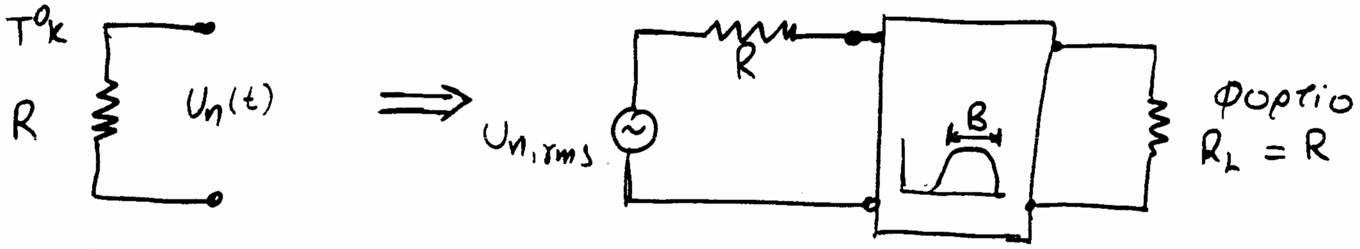




Ισοδύναμο Thevenin Πηγής Θορύβου:

→ Μια πραγματική αντίσταση θορύβου R που παράγει θόρυβο, μπορεί να αντικατασταθεί από μια ιδανική αντίσταση ίδιας τιμής και μια πηγή τάσης v_n.

→ Μπορεί να προστεθεί και ένα ιδανικό ζωνοπερατό φίλτρο που δίνει τον περιορισμό του εύρους ζώνης:



Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς

- Γεννήτριας: $P_{av} = \frac{1}{2}\frac{|V_g|^2}{4R_g} = \frac{|V_{g,rms}|^2}{4R_g}$ αν $Z_L = Z_g^*$
- Πηγής Θορύβου: $P_n = \frac{|\bar{v}_n|^2}{4R}$ αν $R_L = R$

Ισχύς ~~Θορύβου~~ $P_n = \frac{|v_n|^2}{4R} = \frac{\cancel{4}KTB\cancel{R}}{\cancel{4R}} = KTB$

Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς θορύβου → αν $R_L = R$

Ισοδύναμη Πηγή Θορύβου - Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου:

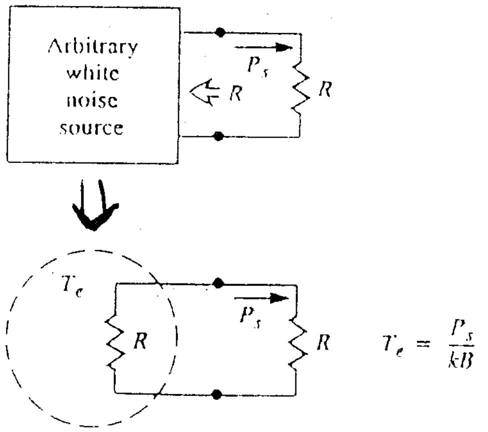
Οποιαδήποτε πηγή λευκού θορύβου (θερμική ή όχι) μπορεί να μοντελοποιηθεί με μια θερμική πηγή (αντίσταση θορύβου) ίδιας ισχύος θορύβου σε μια ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου T_e:

$$P_n = KT_eB \Rightarrow T_e = \frac{P_{ne}}{KB} = \frac{P_s}{KB} \qquad P_{ne} = P_s$$

Ο θόρυβος που παράγουν στοιχεία όπως ενισχυτές, μίκτες, κ.λ.π. ή και ολόκληρα συστήματα, δέκτης για παράδ. μπορεί να ληφθεί υπόψη με μια ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου.

Μοντελοποίηση πηγής λευκού θορύβου με ισοδύναμη θερμική πηγή θορύβου:

Πηγή λευκού θορύβου



Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου:

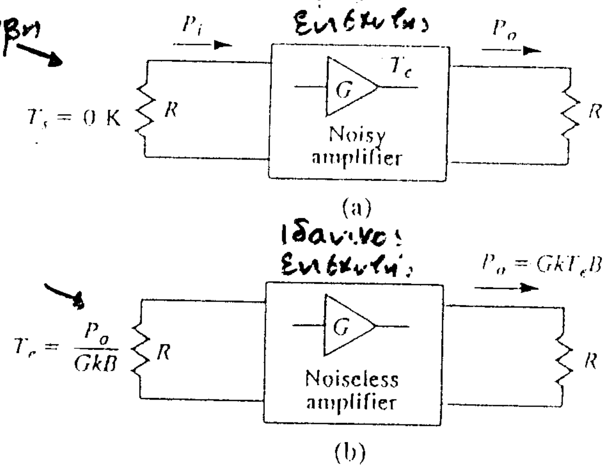
$$T_e = \frac{P_s}{KB}$$

The equivalent noise temperature, T_e, of an arbitrary white noise source.

Μοντελοποίηση Θορύβου Ενισχυτή με ισοδύναμη θερμική πηγή

Υποθετική αθόρυβη αντίσταση ($T_s = 0°K$)

Πραγματικός Ενισχυτής



Ιδανικός Ενισχυτής

Ισοδύναμη θερμική πηγή θορύβου

P_o = ισχύς που οφείλεται στο θόρυβο που παράγει ο ίδιος ο ενισχυτής

$$P_o = KT_eB \cdot G$$

↓

$$T_e = \frac{P_o}{KB \cdot G}$$

Defining the equivalent noise temperature of a noisy amplifier. (a) Noisy amplifier. (b) Noiseless amplifier.

Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου ενός ενισχυτή

Ενεργός Πηγή θορύβου:

→ Μπορεί να χαρακτηρισθεί από μια ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου T_N. Ποιο χρήσιμο όμως μέγεθος είναι η Περίσσεια ισχύος θορύβου; Excess Noise Ratio: ENR: 20÷40 dB

$$ENR(dB) = 10\log\left\{\frac{P_N - P_o}{P_o}\right\} = 10\log\left\{\frac{T_N - T_o}{T_o}\right\}$$

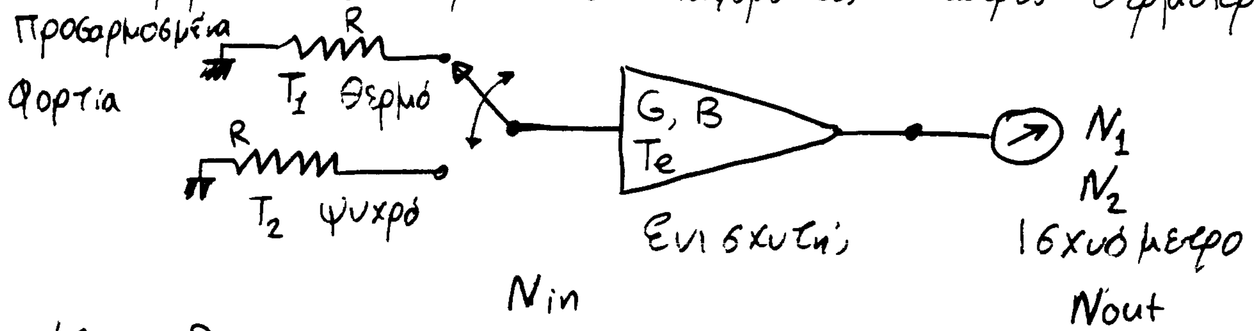
P_N, T_N = ισχύς θορύβου και ισοδύναμη θερμοκρασία πηγής

P_o, T_o = " " " " " αντίστοιχα σε T_o

$P_N = KT_NB$ $\quad P_o = KT_oB$, $\quad T_o = 300°K$

Μέτρηση της Ισοδύναμης Θερμοκρασίας Θορύβου με την μέθοδο του Συντελεστή - Y

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί αν υπάρχουν διαθέσιμα δύο φορτία σε σημαντικά διαφορετικές σταθερές θερμοκρασίες:



Ισχύς θορύβου στην είσοδο του ενισχυτή $N_{in} = K T_i B$

Ισχύς θορύβου που παράγει ο ίδιος ο ενισχυτής: ή πρόσθετος θόρυβος $\Big\}$ $\Delta N = K T_e B G$

Ισχύς θορύβου στην έξοδο του ενισχυτή: $N_{out} = N_{in} G + \Delta N$

Θερμό φορτίο $\quad N_1 = N_{out} = K T_1 B G + K T_e B G$

Ψυχρό φορτίο $\quad N_2 = N_{out} = K T_2 B G + K T_e B G$

Συντελεστής - Y:

$$Y = \frac{N_1}{N_2} = \frac{T_1 + T_e}{T_2 + T_e} > 1$$

μέτρηση

$$Y(dB) = N_1\,(dBm) - N_2\,(dBm)$$

Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου:

$$T_e = \frac{T_1 - T_2 Y}{Y - 1}$$

Η τιμή της αντίστασης φορτίου R επιλέγεται έτσι ώστε να υπάρχει προσαρμογή στην είσοδο. Συνήθως $R = 50\Omega$, αφού έχουμε σύστημα χαρακτηριστικής 50Ω.

Επιλογή θερμοκρασιών - φορτίων:

Η διαφορά των θερμοκρασιών T_1, T_2 πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη. Η μία θερμοκρασία είναι η $T_0 = 300°K$ τυπική θερμοκρασία 17°C

Εάν $T_e > T_0$ σαν θερμό φορτίο χρησιμοποιείται πηγή θορύβου

Για $T_e < T_0$ σαν ψυχρό φορτίο → τοποθέτηση της R < Υγρό άζωτο $T = 77°K$ / Υγρό Ήλιο $T = 4°K$

Δείκτης Θορύβου: F_n

$$F_n = \frac{\text{Θόρυβος στην έξοδο πραγματικού ενισχυτή}}{\text{Θόρυβος στην έξοδο ιδανικού ενισχυτή}} = \frac{N_{out}}{N_{in} \cdot G}$$

Κέρδος $G = S_{out} / S_{in}$ = ισχύς εξόδου / ισχύ εισόδου

Άρα: $$F_n = \frac{N_{out}}{N_{in} \cdot (S_{out}/S_{in})} = \frac{S_{in}/N_{in}}{S_{out}/N_{out}} = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}}$$

ή

$$F_n\,(dB) = (S/N)_{in}\,(dB) - (S/N)_{out}\,(dB)$$

Δηλαδή, ο δείκτης θορύβου παριστάνει τη μείωση του λόγου Σήματος-προς-Θόρυβο από την είσοδο στην έξοδο του ενισχυτή.

Συσχέτιση με την θερμοκρασία θορύβου:

$$F_n = \frac{N_{out}}{N_{in} \cdot G} = \frac{N_{in} G + \Delta N}{N_{in} \cdot G} = \frac{\Delta N}{N_{in} \cdot G} + 1 = 1 + \frac{K T_e B G}{K T_o B G} = 1 + \frac{T_e}{T_o}$$

και $N_{in} = K T_o B$ όπου $T_o = 300^o K$ = τυπική θερμοκρασία

άρα: $\boxed{F_n = 1 + \frac{T_e}{T_o}}$ ή $\boxed{T_e = (F_n - 1)\,T_o}$

Δείκτης Θορύβου Παθητικού στοιχείου, με απώλειες L

→ Προσοχή! Ένας εξασθενητής μειώνει μόνο την ισχύ του σήματος αλλά όχι του θορύβου, αφού ο ίδιος βρίσκεται σε θερμοκρασία T_o και παράγει θόρυβο.

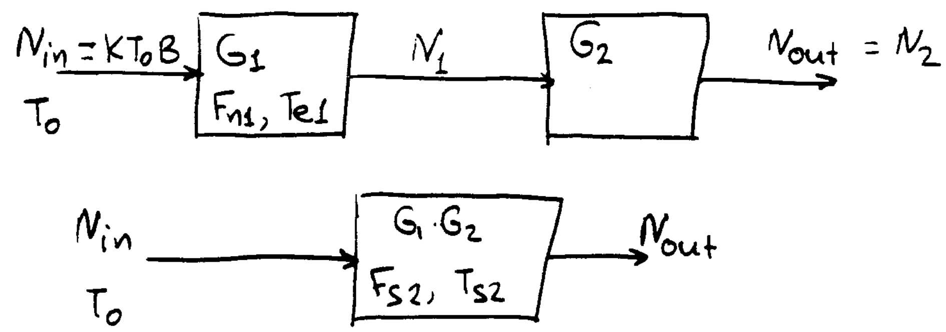
→ Αν ο εξασθενητής βρίσκεται σε θερμοκρασία $T > T_o$ τότε παράγει πρόσθετο θόρυβο.

Αν $T = T_o$ τότε $N_{out} = N_{in} = K T_o B$

Απώλειες Εξασθενητή (π.χ. Γραμμή): $L = S_{in} / S_{out} > 1$

$$F_n = \frac{N_{out}/N_{in}}{S_{out}/S_{in}} = \frac{1}{1/L} = L$$

Δείκτης Θορύβου Πολλαπλών εν-σειρά βαθμίδων



Ισχύς θορύβου στην έξοδο της 1ης βαθμίδας

$$N_1 = N_{in}\cdot G_1 + \Delta N_1 = KT_0B\cdot G_1 + KT_{e1}B\cdot G_1$$

Ισχύς θορύβου στην έξοδο της 2ης βαθμίδας

$$N_{out} = N_2 = N_1\cdot G_2 + \Delta N_2 = K(T_0+T_{e1})BG_1\cdot G_2 + KT_{e2}B\cdot G_2$$

άρα: $$N_{out} = KBG_1G_2\left(T_0 + T_{e1} + \frac{1}{G_1}T_{e2}\right) \quad (1)$$

Ισχύς θορύβου στην έξοδο του ισοδύναμου συστήματος:

$$N_{out} = N_{in}\cdot G_1G_2 + \Delta N = KT_0B\cdot G_1G_2 + KT_{S2}B\cdot G_1G_2 \quad (2)$$

Εξισώνοντας τις (1) και (2):

$$KBG_1G_2\left(T_{e1}+\frac{1}{G_1}T_{e2}\right) = KBG_1G_2\cdot T_{S2}\Big\}\quad \boxed{T_{S2} = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1}}$$

Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου N βαθμίδων:

$$T_S = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1G_2} + \dots + \frac{T_{eN}}{G_1G_2\cdots G_{N-1}}$$

Δείκτης θορύβου δύο βαθμίδων:

$$\left.\begin{array}{l} F_{S2} = 1 + \dfrac{T_{S2}}{T_0} \\ T_{ei} = (F_{ni}-1)T_0 \end{array}\right\} \quad F_{S2} = 1 + \frac{(F_{n1}-1)\cancel{T_0}}{\cancel{T_0}} + \frac{(F_{n2}-1)\cancel{T_0}}{G_1\cdot\cancel{T_0}}$$

$$\boxed{F_{S2} = F_{n1} + \frac{F_{n2}-1}{G_1}}$$

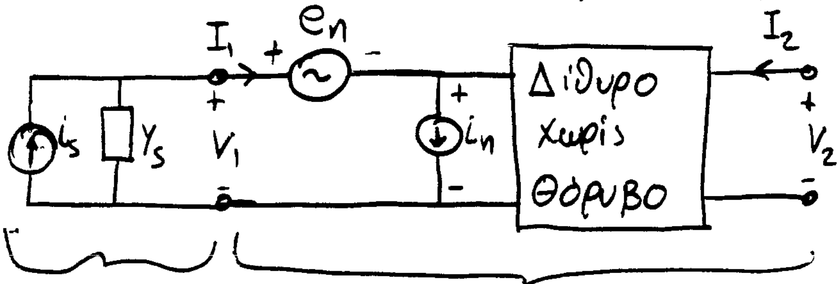
Δείκτης Θορύβου N-Βαθμίδων:

$$F_S = F_{n1} + \frac{F_{n2}-1}{G_1} + \frac{F_{n3}-1}{G_1G_2} + \dots + \frac{F_{nN}-1}{G_1G_2\cdots G_{N-1}}$$

Η κυριότερη συνεισφορά προέρχεται από την πρώτη βαθμίδα ⇒
⇒ 1η βαθμίδα: Σχεδιασμός Ελάχιστου θορύβου + Ικανοποιητικό Κέρδος

Αναπαράσταση Θορύβου Διθύρου δικτύου: (Bhartia σελ. 77!) (Vendelin σελ. 77)

Γενικά, οποιοδήποτε πραγματικό δίθυρο (παράγει το ίδιο θόρυβο) μπορεί να παρασταθεί με ένα ιδανικό δίθυρο και δύο πηγές θορύβου στην είσοδό του:



i_s = θόρυβος πηγής εισόδου
Y_s = σύνθ. αγωγ. πηγής εισόδου

Θερμικός θόρυβος εισόδου

Πραγματικό (θορυβώδες δίθυρο)

e_n αντιπροσωπεύει το θόρυβο του διθύρου όταν η σύνθετη αντίσταση της πηγής που συνδέεται στην είσοδο είναι μηδέν (βραχυκυκλωμένη)

i_n αντιπροσωπεύει το θόρυβο του διθύρου όταν η σύνθετη αγωγιμότητα της πηγής είναι μηδέν $\Leftrightarrow$ όταν η είσοδος είναι ανοιχτοκυκλωμένη.

Οι πηγές e_n, i_n δεν είναι τελείως ανεξάρτητες έτσι:

$i_n = i_c + i_u$ $\begin{cases} i_u = \text{συνιστώσα ανεξάρτητη από την } e_n \\ i_c = \text{-||- συσχετισμένη με την } e_n \end{cases}$

$i_c = Y_{cor}\, e_n$ Y_{cor} = σύνθετη αγωγιμότητα συσχέτισης (μιγαδική ποσότητα)

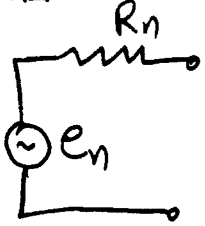
$i_n = Y_{cor}\, e_n + i_u$ μέση τιμή $\Rightarrow \overline{e_n^* i_n} = Y_{cor}\,\overline{e_n}\,\overline{e_n^*} + \cancel{\overline{i_u}\,\overline{e_n^*}} = Y_{cor}\,\overline{e_n^2}$

επειδή είναι ασυσχέτιστα.

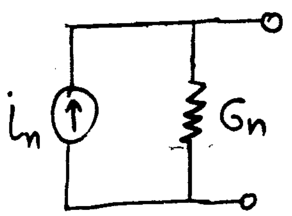
άρα:

$$Y_{cor} = \frac{\overline{e_n^*\, i_n}}{\overline{e_n^2}}$$

Άλλα: Ισοδύναμες πηγές θορύβου



Thevenin



Norton

$e_{n,rms} = \sqrt{4KTR_nB}$ $\quad i_{n,rms} = \sqrt{4KTG_nB}$

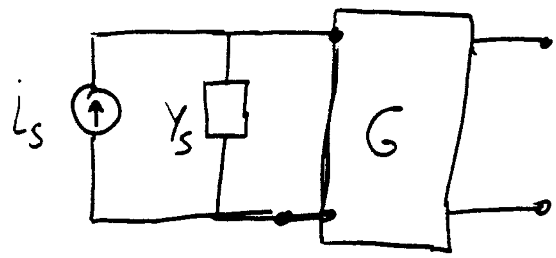
Ορίζονται έτσι οι αντιστάσεις και αγωγιμότητες θορύβου.

$$R_n = \frac{|e^2_{n,rms}|}{4KTB}, \quad G_c = \frac{|i^2_{c,rms}|}{4KTB}, \quad G_u = \frac{|i^2_{u,rms}|}{4KTB}, \quad G_s = Re(Y_s) = \frac{|i^2_{s,rms}|}{4KTB}$$

Συσχέτιση Δείκτη Θορύβου και Εσωτερικών Πηγών Θορύβου

$$F_n = 1 + \frac{\Delta N}{N_{in}\cdot G} = 1 + \frac{\text{Ισχύς Εσωτερικού Θορύβου}\cdot G}{\text{Θόρυβος στην Είσοδο ιδανικού διθύρου}}$$

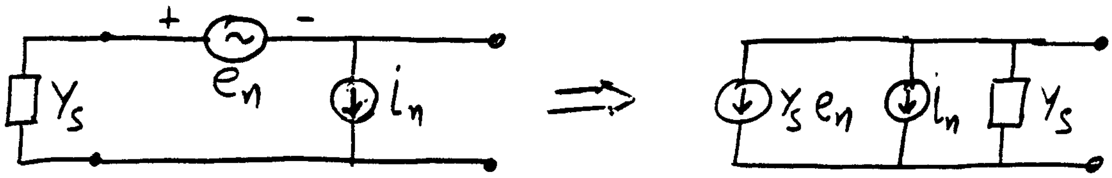
Ιδανικό δίθυρο



$$N_{in} = \frac{i^2_{s,rms}}{4\,G_s} = \text{μέγιστη διαθέσιμη ισχύς}$$

$$G_s = Re(Y_s)$$

Εσωτερικές Πηγές μόνο:



$$\Delta N = G\cdot\frac{|i_n + Y_s e_n|^2}{4\,G_s}$$

Άρα, ο δείκτης θορύβου γίνεται: (Είναι όλες rms τιμές)

$$F_n = 1 + \frac{\cancel{G}\cdot|i_n + Y_s e_n|^2/\cancel{4G_s}}{\cancel{G}\,|i_s|^2/\cancel{4G_s}} = 1 + \frac{|i_n + Y_s e_n|^2}{|i_s|^2}$$

Θέτοντας $i_n = Y_{cor}\cdot e_n + i_u$ και $\overline{i_u}\cdot\overline{e_n} = 0$ λόγω ανεξαρτησίας:

$$|i_n + Y_s e_n|^2 = |i_u|^2 + \{Y_s^2 + Y_{cor}^2 + 2Y_s Y_{cor}\}|e_n^2| = |i_u|^2 + |Y_s + Y_{cor}|^2|e_n^2|$$

Θέτοντας $Y_s = G_s + jB_s$, $Y_{cor} = G_{cor} + jB_{cor}$ και

$|e_{n,rms}|^2 = 4kTB\cdot R_n$, $|i_{u,rms}|^2 = 4kTB\cdot G_u$, $|i_{s,rms}|^2 = 4kTB\cdot G_s$

Παίρνουμε:

$$F_n = 1 + \frac{|i_{u,rms}|^2}{|i_{s,rms}|^2} + \frac{\{(G_s+G_{cor})^2 + (B_s+B_{cor})^2\}|e_{n,rms}|^2}{|i_{s,rms}|^2}$$

άρα:

$$F_n = 1 + \frac{G_u}{G_s} + \frac{R_n}{G_s}\{(G_s + G_{cor})^2 + (B_s + B_{cor})^2\}$$

Βέλτιστος = Ελάχιστος Δείκτης Θορύβου:

Απο την συσχέτιση F_n και Εσωτερικών πηγών θορύβου: e_n, i_n

$$F_n = 1 + \frac{G_u}{G_s} + \frac{R_n}{G_s} \cdot \left\{ (G_s + G_{cor})^2 + (B_s + B_{cor})^2 \right\} \quad (1)$$

Όπου $Y_s = G_s + j B_s$ = σύνθετη αγωγιμότητα πηγής στην είσοδο

Εναλλακτικά, με την σύνθετη αντίσταση πηγής $Z_s = R_s + j X_s$

$$F_n = 1 + \frac{R_u}{R_s} + \frac{G_n}{R_s} \left\{ (R_s + R_{cor})^2 + (X_s + X_{cor})^2 \right\} \quad (2)$$

Υπάρχει κάποια βέλτιστη σύνθετη Αγωγιμότητα (Y_s) ή αντίσταση (Z_s) Πηγής για την οποία ο δείκτης θορύβου F_n ελαχιστοποιείται;

Ελαχιστοποίηση (μηδενισμός παραγώγων) της (1) ως προς G_s, B_s ή της (2) ως προς R_s, X_s δίνει:

Βέλτιστη Σύνθετη αντίσταση πηγής $Z_s = Z_{on} = R_{on} + j X_{on}$

$$R_{on} = \sqrt{\frac{R_n}{G_n} + R_{cor}^2} \quad \text{και} \quad X_{on} = -X_{cor}$$

Και ελάχιστο δείκτη θορύβου:

$$F_{min} = F_n \Big|_{R_s = R_{on},\ X_s = X_{on}} = 1 + 2 G_n R_{cor} + 2\sqrt{R_u G_n + (G_n R_{cor})^2} \quad (3)$$

ΠΡΟΣΟΧΗ! Ο ελάχιστος δείκτης θορύβου δεν προκύπτει απο τη συνθήκη Συζυγούς Προσαρμογής

Ακόμη η $X_s = X_{on} = -X_{cor}$ Ελαχιστοποιεί το θόρυβο απο τις δύο πηγές e_n και i_n. Αφού το ρεύμα $Y_s e_n$ αποκτά 180^0 διαφ. φάσης ως προς i_n

Αντικαθιστώντας την (3) στην (2) παίρνουμε:

$$F_n = F_{min} + \frac{G_n}{R_s} \left| Z_s - Z_{on} \right|^2$$

Εναλλακτικά απο την (1):

$$F_n = F_{min} + \frac{R_n}{G_s} \left| Y_s - Y_{on} \right|^2$$

Βέλτιστος Συντελεστής Ανάκλασης Πηγής $\rightarrow F_n = F_{min}$

Προκύπτει για $Z_s = Z_{on}$ ή $Y_s = Y_{on} \Longrightarrow \Gamma_s = \Gamma_{on} = \Gamma_{opt.}$

Είναι: $\Gamma_{on} = \Gamma_{opt.} = \dfrac{Z_{on} - Z_o}{Z_{on} + Z_o} = \dfrac{Y_o - Y_{on}}{Y_o + Y_{on}}$

Δείκτης θορύβου συναρτήσει του Γ_{on}, όπου $r_n = R_n / Z_o$

$$F_n = F_{min} + \frac{4 r_n \, |\Gamma_s - \Gamma_{on}|^2}{(1 - |\Gamma_s|^2) \cdot |1 + \Gamma_{on}|^2} \quad \leftarrow (a)$$

όπου: $\Gamma_s = \dfrac{Z_s - Z_o}{Z_s + Z_o}$ Απόδειξη: Pozar σελ. 628

Η μέτρηση του δείκτη θορύβου υπό συνθήκες προσαρμογής χωρίς ανακλάσεις στην είσοδο $Z_s = Z_o$ είναι χρήσιμη στον προσδιορισμό της συσχέτισης μεταξύ αντίστασης θορύβου $r_n = R_n / Z_o$ και βέλτιστου δείκτη θορύβου Γ_{on}:

$Z_s = Z_o = 50\Omega \rightarrow \Gamma_s = 0$

Και $F_{50} = F_n \Big|_{\Gamma_s = 0} = F_{min} + \dfrac{4 r_n \, |\Gamma_{on}|^2}{|1 + \Gamma_{on}|^2}$

Άρα:

$$\boxed{r_n = (F_{50} - F_{min}) \frac{|1 + \Gamma_{on}|^2}{4 \, |\Gamma_{on}|^2}}$$

Συμπερασματικά: για τον χαρακτηρισμό ενός διθύρου ως προς τον θόρυβο πρέπει να είναι γνωστά: F_{min}, $r_n = \dfrac{R_n}{50}$, Γ_{on}. Οι παράμετροι αυτοί δίνονται από μετρήσεις (κατασκευαστής).

ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ Ν-όμοιων ΒΑΘΜΙΔΩΝ

$F_i = F_{min} \rightarrow$ Υπόθεση βέλτιστου σχεδιασμού όλων των βαθμίδων, δηλαδή $\Gamma_{Si} = \Gamma_{on}$ (δύσκολα επιτυγχάνεται) και $G_i = G_a$

$$F_{o\lambda} = 1 + (F_{min} - 1) + \frac{(F_{min} - 1)}{G_a} + \frac{(F_{min} - 1)}{G_a^2} + \dots = 1 + (F_{min} - 1)\left(1 + \frac{1}{G_a} + \frac{1}{G_a^2} + \dots\right)$$

"Άπειρες" βαθμίδες φθίνουσα γεωμετρική πρόοδος $\Big\}$ $F_{o\lambda} - 1 = \dfrac{F_{min} - 1}{1 - 1/G_a} = M_{min} =$ Ελάχιστο Μέτρο Θορύβου.

Κύκλοι Σταθερού Δείκτη Θορύβου F_n = σταθ.

Από την έκφραση για τον δείκτη θορύβου πολλαπλών βαθμίδων

$$F_S = F_{ολ} = F_1 + \frac{F_2-1}{G_1} + \frac{F_3-1}{G_1 G_2} + \dots$$

Παρατηρεί κανείς ότι ο ολικός δείκτης θορύβου $F_{ολ} = F_{system}$ καθορίζεται κυρίως από την πρώτη βαθμίδα. Ο $F_{ολ}$ θα γίνει ελάχιστος αν ο F_1 ελαχιστοποιηθεί ενώ ταυτόχρονα το κέρδος G_1 παραμείνει μέγιστο. Αυτές όμως οι δύο απαιτήσεις δεν μπορούν να επιτευχθούν ταυτόχρονα αφού:

- Ελαχιστοποίηση $F_1 \Leftrightarrow F_1 = F_{min}$ απαιτεί $\Gamma_S = \Gamma_{on}$ = προσαρμογή θορύβου
- Μεγιστοποίηση G_1 απαιτεί συζυγή προσαρμογή εισόδου $\Gamma_S = \Gamma_{in}^*$

  και $\Gamma_{in} = S_{11} + \dfrac{S_{12} S_{21} \Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L}$

Απαιτείται έτσι ένας συμβιβασμός των δύο απαιτήσεων. Αυτό γίνεται σχεδιάζοντας τους:

Κύκλους σταθερού δείκτη θορύβου F_n = σταθ.

Κύκλους σταθερού κέρδους G = σταθ.

και επιλέγοντας μια συμβιβαστική λύση για το Γ_S

Κύκλοι σταθερού δείκτη θορύβου: $F_n = F_i$ = σταθ.

Ορίζεται η παράμετρος δείκτη θορύβου N_i σαν:

$$N_i = \frac{|\Gamma_S - \Gamma_{on}|^2}{1 - |\Gamma_S|^2} = \frac{F_i - F_{min}}{4 r_n}\,|1 + \Gamma_{on}|^2 \qquad (β)$$

εξίσωση (α)

Pozar εξ. 6.28 ?
Liao εξ. 117 $\Longrightarrow$

$$\left| \Gamma_S - \underbrace{\frac{\Gamma_{on}}{N_i + 1}}_{\text{κέντρο}} \right|^2 = \underbrace{\frac{N_i^2 + N_i\left(1 - |\Gamma_{on}|^2\right)}{(N_i + 1)^2}}_{\text{ακτίνα } r_{F_i}^2}$$

Οικογένεια κύκλων:

Κέντρα: $C_{F_i} = \dfrac{\Gamma_{on}}{N_i + 1}$

Ακτίνα: $r_{F_i} = \dfrac{\sqrt{N_i^2 + N_i\left(1 - |\Gamma_{on}|^2\right)}}{N_i + 1}$

Παρατηρήσεις:
Δεξιό μέλος (β) $F_i \longrightarrow N_i$
$N_i = 0 \longrightarrow \begin{cases} \Gamma_S = \Gamma_{on} \\ F_i = F_{min} \end{cases}$

Επομένως αν Γ_S σε κάποιο κύκλο δίνει $F_n = F_i$ για τον κύκλο αυτό

Παράδειγμα κύκλων F_n = σταθ. (από Liao σελ. 117-118)

Τρανζίστορ: GaAs MESFET

Επιλογή Γ_s πάνω στους κύκλους F_n = σταθ.

Αν: $\Gamma_s = \Gamma_{opt}$

$\Downarrow$

$F_n = F_{min}$

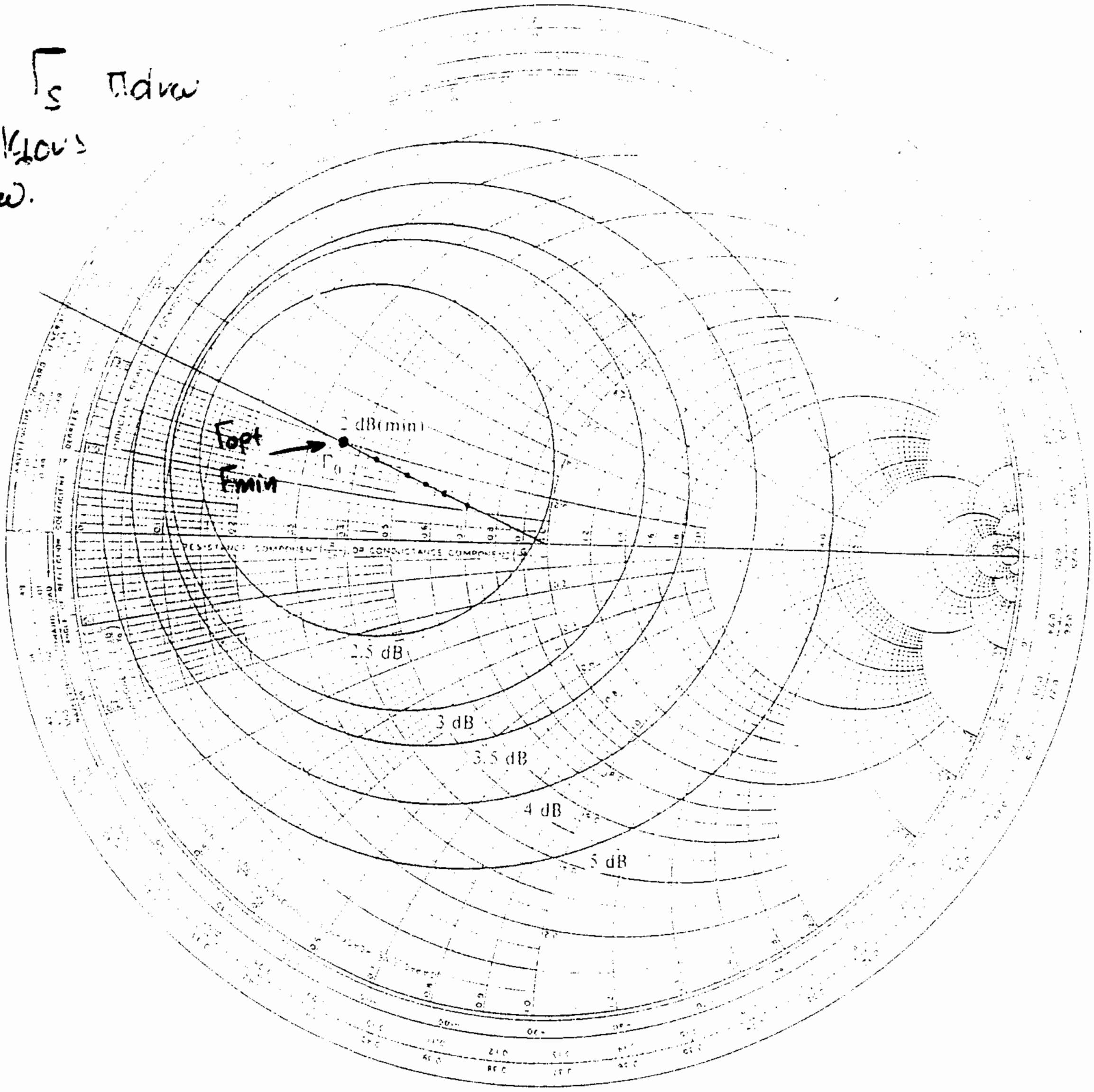


Figure 3-8-1 Noise-figure circles for Example 3-8-1. (Liao)

Δεδομένα: $V_{ds} = 5V$, $I_{ds} = 20mA$, $Z_0 = 50\Omega$, $f = 9GHz$

Μετρήσεις θορύβου: $\begin{cases} F_{min} = 2\,dB, \quad \Gamma_{on} = \Gamma_{opt} = 0.485\ \underline{/155^\circ} \\ R_n = 4\Omega \end{cases}$

Τα κέντρα των κύκλων F_n = σταθ. κείτονται πάνω στην ευθεία που ενώνει το κέντρο του χάρτη Smith (0,0) με το σημείο Γ_{opt}

Παράδειγμα: Σχεδιασμός Ενισχυτή Χαμηλού Θορύβου
(Pozar σελ. 629)

Δεδομένα: GaAs FET, $f = 4GHz$, $Z_0 = 50\Omega$
d.c. Πόλωση ⟷ για Ελάχιστο δείκτη θορύβου

$S_{11} = 0.6 \angle -60^\circ$, $S_{21} = 1.9 \angle 81^\circ$, $S_{12} = 0.05 \angle 26^\circ$, $S_{22} = 0.5 \angle -60^\circ$

$F_{min} = 1.6\ dB$, $\Gamma_{opt} = 0.62 \angle 100^\circ$, $R_n = 20\Omega$

Σκοπός: Σχεδιασμός για $F_n = 2dB$ και μέγιστο δυνατό κέρδος

1) Χρησιμοποιείται η Μονόπλευρη (unilateral) προσέγγιση $S_{12} \cong 0$

σφάλμα: $\dfrac{1}{(1+M)^2} < \dfrac{G_t}{G_{tu max}} < \dfrac{1}{(1-M)^2} \iff -0.5dB < \dfrac{G_t}{G_{tumax}} < 0.53dB$

σφάλμα $\pm 0.5\ dB$ απροσδιοριστία κέρδους

2) Σχεδιασμός κύκλου θορύβου για $F_i = 2dB = 1.58$

$N_i = \dfrac{F_i - F_{min}}{4 R_n / Z_0} = 0.0986$ και $C_{F_i} = 0.56 \angle 100^\circ$, $r_{F_i} = 0.24$

3) Σχεδιασμός κύκλων σταθερού κέρδους-Εισόδου (πηγής) $g_s = σταθ.$

μονόπλευρη περίπτωση: $g_s = \dfrac{1 - |\Gamma_s|^2}{|1 - S_{11}\Gamma_s|^2} = σταθ.$)

Έστω $g_s = 1.0, 1.5, 1.7\ dB$

4) Επιλογή του Γ_s: στο σημείο τομής των κύκλων:

$F_i = 2dB$ και $g_s = 1.7dB \Longrightarrow \Gamma_s = 0.53 \angle 75^\circ$

5) Επιλογή του συντελεστή ανάκλασης φορτίου Γ_L

Επιλογή συζυγούς προσαρμογής εξόδου $\Gamma_L = S_{22}^* = 0.5 \angle +60^\circ$

για την μεγιστοποίηση του κέρδους εξόδου g_L

6) Κέρδος εξόδου: $g_L = \left. \dfrac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2} \right|_{\Gamma_L = S_{22}^*} = \dfrac{1}{1 - |S_{22}|^2} = 1.33 = 1.25dB$

7) Ολικό κέρδος ενισχυτή

$G_{tu} = g_s \cdot G_0 \cdot g_L \Rightarrow G_{tu}(dB) = g_s(dB) + G_0(dB) + g_L(dB) =$

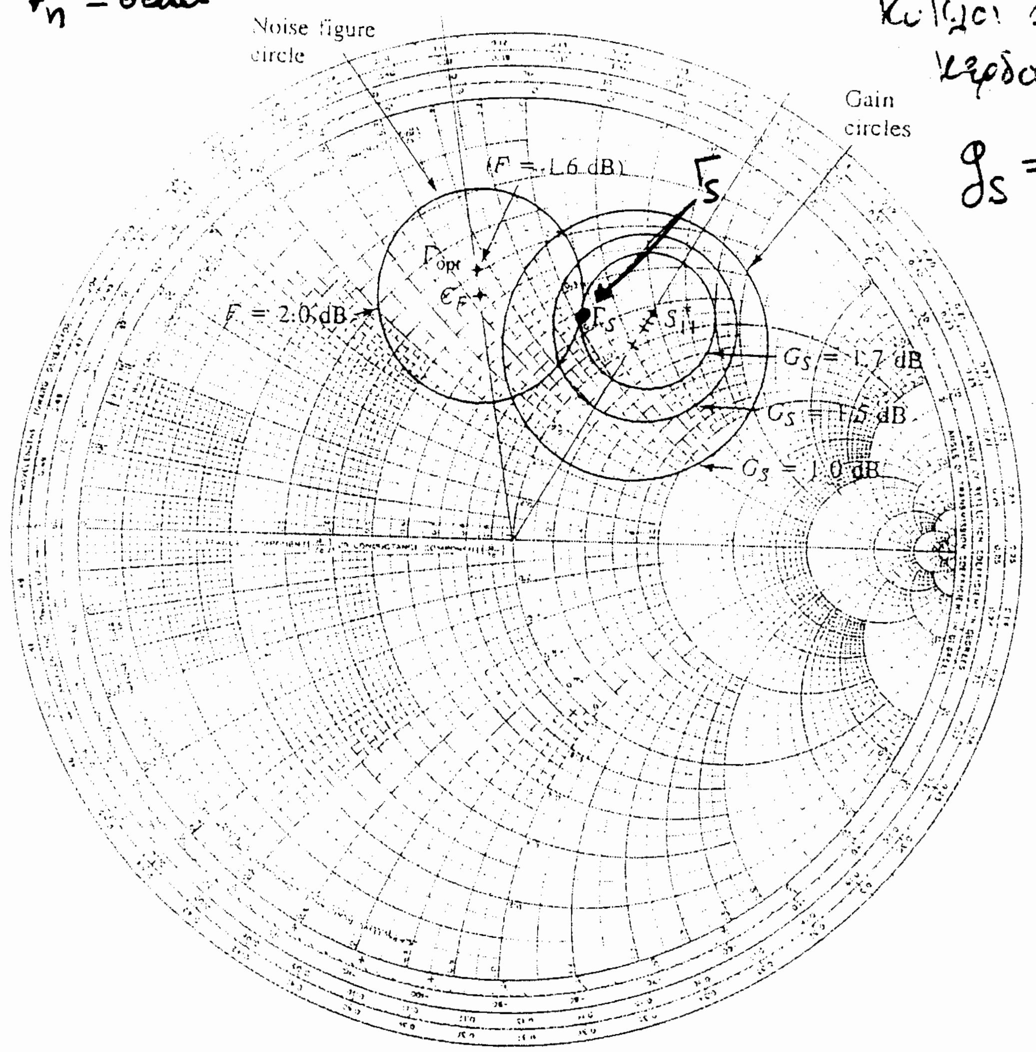
κέρδος Τρανζίστορ. $= 8.53\ dB$

$G_0 = |S_{21}|^2 = 3.61 = 5.58dB$

Σχεδιασμός Ενισχυτή χαμηλού θορύβου:

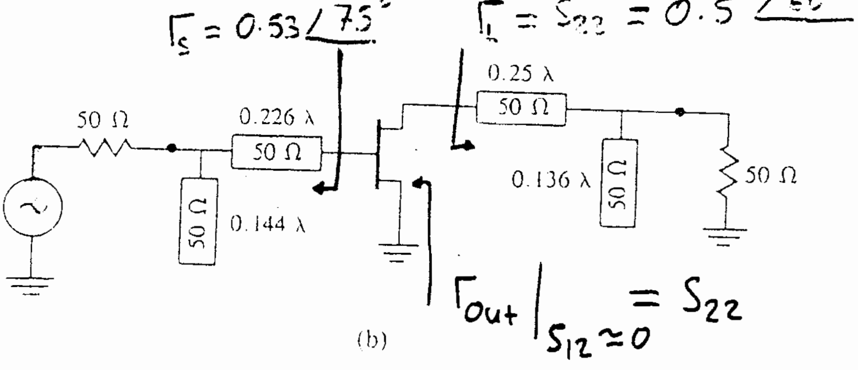
Κύκλοι F_n = σταθ.

Κύκλοι σταθερού κέρδους εισόδου g_s = σταθ.



(a)

Τοπολογία Ενισχυτή χαμηλού θορύβου:
(μονόπλευρη προσέγγιση $S_{21} \simeq 0$)



(b)

FIGURE 11.30 Circuit design for the transistor amplifier of Example 11.8. (a) Constant gain and noise figure circles. (b) RF circuit.

Pozar
σελ. 6?

Σχεδιασμός Ενισχυτή Χαμηλού Θορύβου στενής ζώνης

1. Προδιαγραφές: (Bahl & Bhartia σελ. 506)

   Συχνότητα $f = 12\,GHz$, Εύρος ζώνης $BW \approx 5\% = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$

   Κέρδος $G = 8\,dB$

   Δείκτης θορύβου: $F_n \leq 2.5\,dB$

   Λόγος στασίμων κυμάτων εξόδου: $1.2:1 = V_{SWR}\big|_{out} = \frac{1+|\Gamma_{out}|}{1-|\Gamma_{out}|}$

2. Επιλογή ενεργού στοιχείου → GaAs FET, $f = 12\,GHz$

   $S_{11} = 0.77\,\underline{/-122^\circ}$, $S_{12} = 0.07\,\underline{/40^\circ}$, $S_{21} = 1.36\,\underline{/98^\circ}$, $S_{22} = 0.67\,\underline{/-32^\circ}$

   $F_{min} = 2.11\,dB$, $\Gamma_{opt} = 0.55\,\underline{/118^\circ}$, $R_n = 13.1\,\Omega$

   dc. πόλωση για χαμηλό θόρυβο $V_{ds} = 3V$, $I_{DS} = 10mA$

3. Υπολογισμός του συντελεστή ευστάθειας K

   $K = 1.1 > 1$ → Ευστάθεια χωρίς όρους

   Το συγκεκριμένο τρανζίστορ παρουσιάζει $K < 1$ για $f < 11\,GHz$ και στη περιοχή αυτή πρέπει να σχεδιαστούν οι κύκλοι ευστάθειας.

4. Επιλογή βέλτιστου συντελεστή ανάκλασης πηγής

   $\Gamma_S = \Gamma_{opt} = 0.55\,\underline{/118^\circ} \xrightarrow[\text{smith}]{\text{χάρτης}} Z_S = Z_0 \frac{1+\Gamma_S}{1-\Gamma_S} = 19.1 + j\,26.8\,\Omega$

   → Επίτευξη ελάχιστου δείκτη θορύβου $F_n = F_{min} = 2.11\,dB$

5. Επιλογή συντελεστή ανάκλασης φορτίου Γ_L =;

   Ο σχεδιασμός αυτός στοχεύει σε προσαρμογή χωρίς ανακλάσεις στην έξοδο, δηλαδή χαμηλό VSWRout.

   $$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_S}{1 - S_{11} \Gamma_S}\bigg|_{\Gamma_S = \Gamma_{opt}}$$

   Επιλογή $\Gamma_L = \Gamma_{out}^*$ ⟶ $Z_L = 63.9 + j\,107.6\,\Omega$

6. Προσομοίωση → Σχεδιασμός δικτύων προσαρμογής

   (μέγιστο δυνατό κέρδος $MSG = 11.1\,dB$ → από τεχνικά στοιχεία)

ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

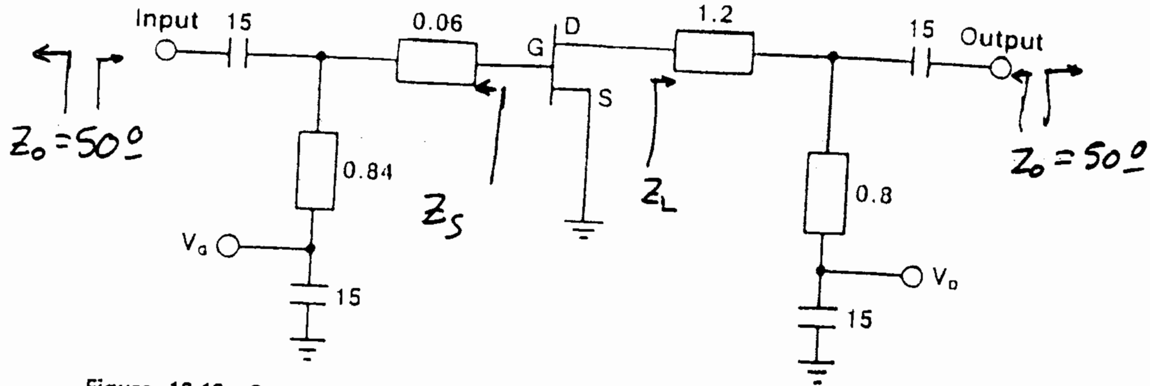


Figure 10.12 Complete amplifier schematic. Microstrip lines width is 0.11 mm. All dimensions are in millimeters. Capacitances are in picofarads.

Υπόστρωμα Αλουμίνας $\varepsilon_r = 9.9$ πάχους $h = 0.25\ mm$

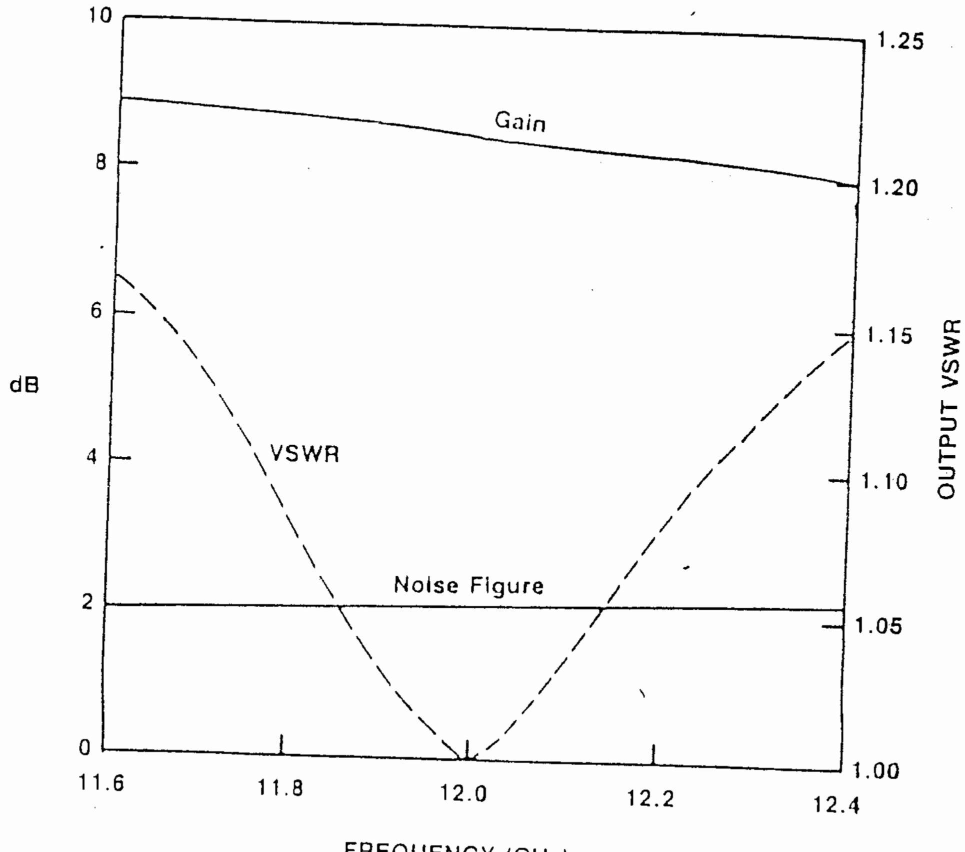
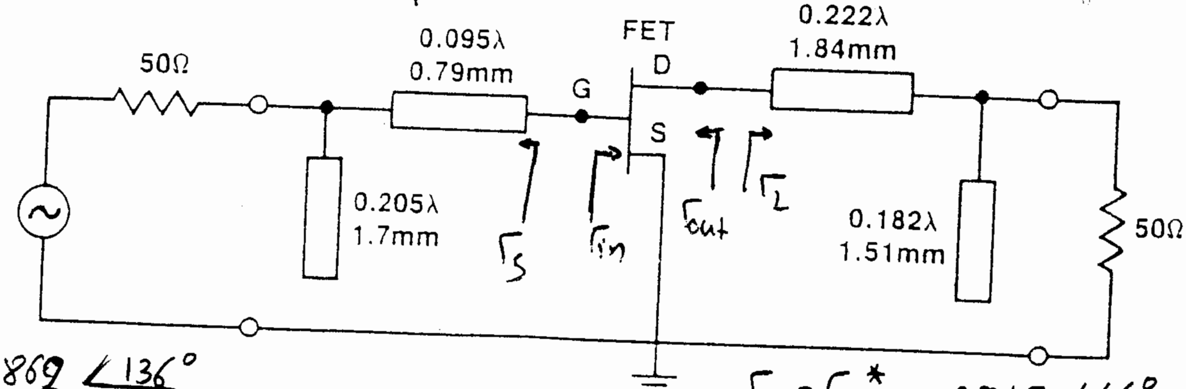


Figure 10.13 Calculated response of a low-noise amplifier.

Ενισχυτής Μεγίστου Κέρδους: (Τρανζίστορ προηγ. παραδείγματος)



$\Gamma_S = \Gamma_{in}^* = 0.869 \angle 136°$

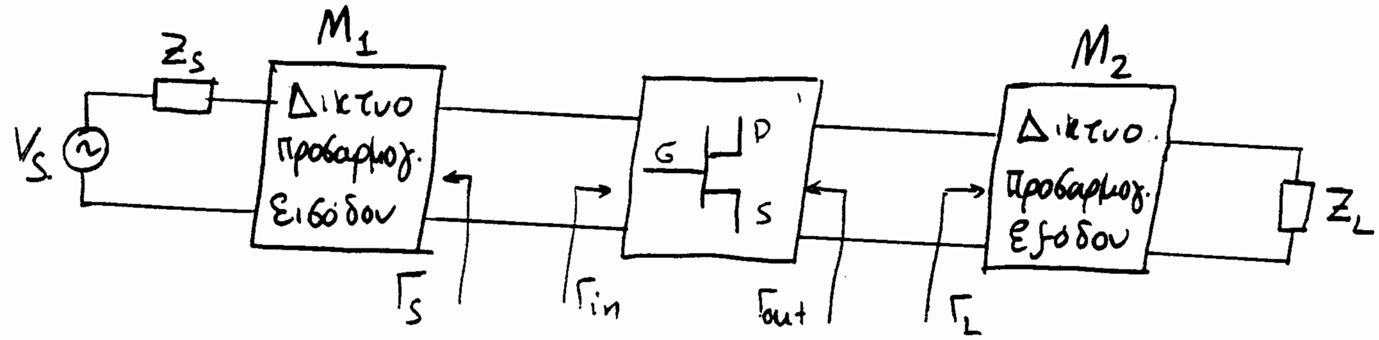
$\Gamma_L = \Gamma_{out}^* = 0.815 \angle 46°$

Figure 10.14 Amplifier schematic. Microstrip width is 0.24 mm and $\lambda = 8.28$ mm at 14 GHz.

$f = 19\ GHz$, $G = 8.5\ dB$

Bhartia

Σχεδιασμός Ενισχυτών Χαμηλού Θορύβου
3 - Δυνατότητες (Vedelin σελ. 230-231)



Δεδομένα: S-παράμετροι τρανζίστορ

F_{min} , R_n, $\Gamma_{on} = \Gamma_{opt}$

Απαιτήσεις:

α) Ελάχιστος δείκτης θορύβου

β) Μέγιστο κέρδος ή μέγιστη ισχύς εξόδου

(1) Σχεδιασμός Χαμηλού θορύβου και μέγιστης μεταφοράς ισχύος στην έξοδο (Η συνηθέστερη τεχνική)

α) Σχεδιασμός του M_1 για $\Gamma_S = \Gamma_{opt} \leftrightarrow$ **Χαμηλός θόρυβος $F_n = F_{min}$**

β) Σχεδιασμός του M_2 για:

$$\Gamma_L = \Gamma_{out}^* = \left(S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_{opt}}{1 - S_{11} \Gamma_{opt}} \right)^*$$

Συζυγής προσαρμογή εξόδου

μειονέκτημα: αυθαίρετος $\leftrightarrow$ ίσως υψηλός λόγος VSWR στην είσοδο

(2) Σχεδιασμός χαμηλού θορύβου και μέγιστης μεταφοράς ισχύος στην Είσοδο (μειονέκτημα: υψηλό VSWRout)

1) Σχεδιασμός του M_1 για $\Gamma_S = \Gamma_{opt} \leftrightarrow$ Χαμηλός θόρυβος $F_n = F_{min}$

2) Σχεδιασμός του M_2 για

$$\underbrace{\Gamma_{in} = \Gamma_{opt}^*}_{\text{Συζυγής προσαρμογή στην είσοδο}} = S_{11} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_L}{1 - S_{22} \Gamma_L} \Longrightarrow \Gamma_L = \frac{S_{11} + \Gamma_{opt}^*}{\Delta - S_{22} \Gamma_{opt}^*}$$

3) Συμβιβασμός των λύσεων (1) και (2) για περίπου ίδια στάθμης $VSWR_{in}$, $VSWR_{out}$ με μια σχετική χειροτέρευση του F_n